

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-251250

(43)Date of publication of application : 14.09.2001

(51)Int.Cl.

H04B 10/152

H04B 10/142

H04B 10/04

H04B 10/06

H04J 14/00

H04J 14/02

H04B 10/02

H04B 10/18

(21)Application number : 2000-061068

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP
<NTT>

(22)Date of filing : 06.03.2000

(72)Inventor : FUKUTOKU KOUSHI
MIYANO TOMOKO

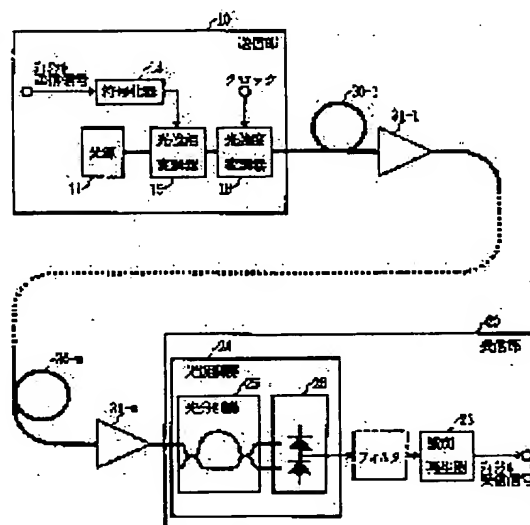
(54) OPTICAL TRANSMITTER AND OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To configure an economical network by relaxing the limit of the number of optical amplifiers and repeaters due to a nonlinear optical effect and deterioration in optical SNR.

SOLUTION: The optical transmitter for configuring a transmission section is provide with a light source, that generates a light with a single wavelength, a phase modulation means that applies phase modulation to a light with a single wavelength by a digital signal, and a intensity modulation means that applies intensity modulation, so that the optical intensity is small at borders of bits of the optical signal that is phase-modulated, and transmits an optical signal, that is phase-modulated and intensity-modulated.

本発明の光伝送装置および光伝送システムの第1の実施形態



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

27.11.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

3625726

[Date of registration] 10.12.2004

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

5

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-251250

(P 2 0 0 1 - 2 5 1 2 5 0 A)

(43) 公開日 平成13年9月14日 (2001.9.14)

(51) Int. Cl. ⁷

識別記号

F I

ターマコード (参考)

H04B 10/152

H04B 9/00

L 5K002

10/142

E

10/04

M

10/06

H04J 14/00

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全14頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2000-61068 (P 2000-61068)

(22) 出願日 平成12年3月6日 (2000.3.6)

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(72) 発明者 福德 光師

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者 宮野 とも子

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日

本電信電話株式会社内

(74) 代理人 100072718

弁理士 古谷 史旺

F ターム (参考) 5K002 AA02 AA04 BA02 BA05 CA01

CA09 DA02 DA05 FA01

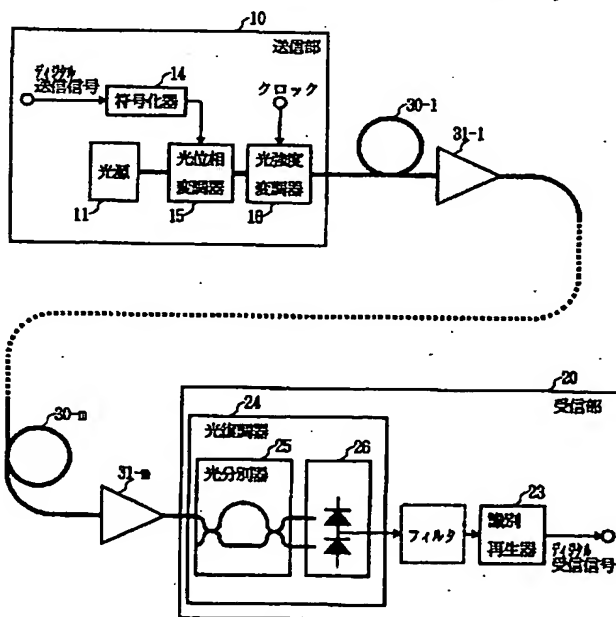
(54) 【発明の名称】 光伝送装置および光伝送システム

(57) 【要約】

【課題】 非線形光学効果および光 S N R 劣化による光増幅中継数の制限を緩和し、経済的なネットワークを構築する。

【解決手段】 送信部を構成する光伝送装置として、単一波長の光を発生する光源と、デジタル信号により単一波長の光を位相変調する位相変調手段と、位相変調された光信号の各ビットの境界で光強度が小さくなるように強度変調する強度変調手段とを備え、位相変調および強度変調された光信号を送信する。

本発明の光伝送装置および光伝送システムの第1の実施形態



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 単一波長の光を発生する光源と、
デジタル信号により前記単一波長の光を位相変調する
位相変調手段と、
前記位相変調された光信号の各ビットの境界で光強度が
小さくなるように強度変調する強度変調手段とを備え、
前記位相変調および前記強度変調された光信号を送信す
ることを特徴とする光伝送装置。

【請求項 2】 異なる波長の光を発生する複数の光源
と、
複数のデジタル信号により前記各波長の光をそれぞれ
位相変調する複数の位相変調手段と、
前記位相変調された各波長の光信号の各ビットの境界で
光強度が小さくなるようにそれぞれ強度変調する複数の
強度変調手段と、
前記位相変調および前記強度変調された各波長の光信号
を合波する光合波器とを備え、
前記光合波器から出力される波長多重光信号を送信する
ことを特徴とする光伝送装置。

【請求項 3】 デジタル信号により位相変調された光
信号を復調して電気信号に変換する光復調手段と、
前記電気信号を識別再生して前記デジタル信号を出力
する識別再生手段とを備え、
請求項 1 に記載の光伝送装置から送信された光信号を前
記光復調手段に受信することを特徴とする光伝送装置。

【請求項 4】 複数のデジタル信号により各波長の光
信号がそれぞれ位相変調された波長多重光信号を各波長
の光信号に分波する光分波器と、
前記各波長の光信号を復調してそれぞれ電気信号に変換
する複数の光復調手段と、
前記各電気信号を識別再生してそれぞれ対応するディジ
タル信号を出力する複数の識別再生手段とを備え、
請求項 2 に記載の光伝送装置から送信された波長多重光
信号を前記光分波器に受信して分波することを特徴とす
る光伝送装置。

【請求項 5】 請求項 3 または請求項 4 に記載の光伝送
装置において、
前記光復調手段で復調された電気信号のクロック周波数
以上の周波数成分を減衰させる手段を備えたことを特徴
とする光伝送装置。

【請求項 6】 請求項 3 または請求項 4 に記載の光伝送
装置において、
光復調手段は、入力された光信号を前後のビット間で干
渉させ、光信号の位相変調成分を強度変調成分に変換す
る光弁別器と、光弁別器の出力光信号を電気信号に変換
する光電変換器とにより構成されたことを特徴とする光
伝送装置。

【請求項 7】 請求項 1 に記載の光伝送装置と、
前記光伝送装置から送信された光信号または波長多重光
信号を送信する光ファイバ伝送路と、

前記光ファイバ伝送路を伝送された前記光信号を受信す
る請求項 3 に記載の光伝送装置とを備えたことを特徴と
する光伝送システム。

【請求項 8】 請求項 2 に記載の光伝送装置と、
前記光伝送装置から送信された光信号または波長多重光
信号を送信する光ファイバ伝送路と、
前記光ファイバ伝送路を伝送された前記波長多重光信号
を受信する請求項 4 に記載の光伝送装置とを備えたこと
を特徴とする光伝送システム。

10 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、デジタル信号に
より位相変調された光信号を送受信する光伝送装置およ
び光伝送システムに関する。

【0002】

【従来の技術】（IM-DD方式）図 9 は、強度変調一
直接検波（IM-DD）方式を用いた従来の波長多重光
伝送システムの構成例を示す。

【0003】図において、送信部 10 では、複数の光源
11-1~11-n で発生させた波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の連続
光を光強度変調器 12-1~12-n に入力し、送信信
号でそれぞれ強度変調した光信号を生成する。各波長の
光信号は、光合波器 13 で波長多重され、光ファイバ伝
送路 30-1~30-m およびその損失を補償する光増
幅器 31-1~31-m を介して受信部 20 まで伝送さ
れる。受信部 20 では、光分波器 21 で各波長の光信号
に分波し、それぞれ対応する受光素子 22-1~22-n
に入力して直接検波し、電気信号に変換する。各電気
信号は、識別再生回路 23-1~23-n により識別再
生され、受信信号として出力される。

【0004】このような IM-DD 方式を用いた光伝送
システムは、1 波長のみを伝送する場合でも、広帯域お
よび低損失な光ファイバ伝送路を用いているために、高
ビットレートの信号を長距離伝送することができる。ま
た、図 9 のように光増幅器 31 を用いることにより、光
信号を光のまま増幅中継することができ、光信号を電
気信号に変換して識別再生する再生中継器を用いる場合
に比べて低コストな光伝送システムを構築できる。さら
に、図 9 のような波長多重光伝送システムでは、光ファ
イバ伝送路 30 および光増幅器 31 を複数の波長で共有
できるので、より経済的なシステムを構築できる。

【0005】しかし、光ファイバ伝送路および光増幅器
で生じる信号劣化要因により、光増幅器のみで中継する
ことはできず再生中継器が必要になる。なお、波長多重
光伝送システムでは、再生中継器は波長数分必要とな
り、波長多重による経済化効果が低減する。

【0006】ここで、光増幅中継数の制限要因のうち、
光増幅器の自然放光（ASE 光）による信号対雑音比
（光 SNR）の劣化、および光ファイバ伝送路の非線形
光学効果による信号劣化について説明する。

【0007】図9のように、光増幅器31のみにより多段に光信号の増幅中継を行う構成では、ASE光が光増幅器を通過するごとに累積される。このため、光信号とASE光との比である光SNRは、送信端に対して受信端で大きく劣化する。また、光SNRが小さくなると、受信部で符号誤り率が増加する。この符号誤り率を一定値以下に保持して信号品質を維持するには、光ファイバ伝送路への入力光パワーを上昇させ、送信端での光SNRを大きくする必要がある。

【0008】しかし、光ファイバ伝送路への入力光パワーを上昇させると、光ファイバ伝送路の非線形光学効果による信号劣化が大きくなる。非線形光学効果は、光ファイバ中を高パワーの光が伝搬するとき、光と光ファイバが相互作用を起こし、光ファイバの屈折率が非線形応答を起こす現象である。光伝送システムで問題となる現象として、自己位相変調と群速度分散の相互作用(SPM+GVD)、相互位相変調と群速度分散の相互作用(XPM+GVD)、四光波混合、誘導ラマン散乱等がある。

【0009】IM-DD方式を用いた光伝送システムにおいて、1波長のみを伝送させた場合には、SPM+GVD効果が顕著になることが報告されている(参考文献:A.Naka et al., "Fiber transmission distance determined by eye opening degradation due to self-phase modulation and group-velocity dispersion", IEEE Electronics Letters, vol.28, pp.2221-2222, 1992)。また、図9のような波長多重光伝送システムにおいて、光伝送路の零分散波長近傍以外の波長を用いた場合には、XPM+GVD効果が顕著になることが報告されている(参考文献:R.Hui et al., "Cross-phase modulation in multispan WDM optical fiber systems", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.17, pp.1018-1026, 1999)。

【0010】(DPSK-DD方式)次に、IM-DD方式に比べて光SNR劣化の影響を低減できるDPSK-DD方式について説明する。DPSK-DD方式は、送信信号を光の位相の変化に対応させて伝送し、受信部で前後のビットを干渉させ、位相変化を強度信号に変換して復調する方式である。

【0011】図10は、DPSK-DD方式を用いた従来の波長多重光伝送システムの構成例を示す。図において、送信部10では、複数の送信信号をそれぞれ符号化器14-1~14-nに入力し、送信信号"0"を"01"または"10"とし、"1"を"11"と符号化する。複数の光源11-1~11-nで発生させた波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の連続光を光位相変調器15-1~15-nに入力し、符号化器14-1~14-nの出力信号によりそれぞれ位相変調した光信号を生成する。このとき、光信号の相対位相は符号化器14-1~14-nの出力信号に対応し、0と π の2値の位相変調信号となる。各波

長の光信号は、光合波器13で波長多重され、光ファイバ伝送路30-1~30-mおよびその損失を補償する光増幅器31-1~31-mを介して受信部20まで伝送される。

【0012】受信部20では、光分波器21で各波長の光信号に分波し、それぞれ対応する光復調器24-1~24-nに入力される。光復調器24は、光弁別器25とバランス型受光器26から構成される。光弁別器25は2入力2出力のマッハツェンダ干渉計により構成し、一方の入力ポートから入力した光信号を2分岐し、その一方に1ビット分時間遅延させた後に合波して2つの出力ポートに出力する。一方の出力ポートには、光の位相に変化が無ければ、干渉によって分岐された光信号が強め合って強度の大きい光信号を出力し、光の位相に変化があれば、干渉によって分岐された光信号が打ち消し合って強度の小さい光信号を出力する。

【0013】送信部10側では、予め送信信号が光信号の位相変化に対応付けられているので、送信信号と等しい光強度信号が光弁別器25の一方の出力ポートから出力される。光弁別器25の他方の出力ポートには、論理反転した光信号が出力される。これらをバランス型受光器26で受光することにより、送信信号に応じた電気信号を復調することができる。各電気信号は、識別再生回路23-1~23-nにより識別再生され、受信信号として出力される。

【0014】ここで、光弁別器25の2つの出力ポートには、可干渉性のない光増幅器のASE光成分は均等に出力され、可干渉性のある光信号は相補的な光信号として出力される。このため、バランス型受光器26の出力にはASE光成分は相殺され、光信号成分は2倍になって出力される。したがって、IM-DD方式と光信号のピークパワーを等しくすると、DPSK-DD方式の光SNRは2倍になり、ASE累積による光SNR劣化の影響を低減することができる。しかし、非線形光学効果については、位相変調を用いた場合でも劣化が生じることが報告されている(参考文献:S.Norimatsu et al., "The influence of cross-phase modulation on optical FDM PSK homodyne transmission systems", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.11, pp.795-804, 1993)。

【0015】以上説明したように、IM-DD方式を用いた光伝送システムでは、光増幅器の多段中継に起因するASE光累積による光SNR劣化と、光ファイバ伝送路における非線形光学効果の影響により、光増幅中継数が制限されている。また、DPSK-DD方式を用いた光伝送システムでは、光SNR劣化に対する制限は緩和できるが、非線形光学効果の影響については低減できず、光増幅中継数の制限要因になっている。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】従来の光伝送システム

において問題となる非線形光学効果のうち、1波長伝送で問題となるSPM+GVD効果、波長多重伝送で問題となるSPM+GVD効果およびXPM+GVD効果について、詳細に説明する。

【0017】(SPM+GVD効果) まず、従来の光伝送システムにおいて、IM-DD方式におけるSPM+GVD効果の影響について説明する。

【0018】図11は、IM-DD方式で生じる自己位相変調による光周波数変化を示す。(a)はNRZ (Non-Return to Zero) 符号を用いた強度変調信号の波形、(b)は誘起される自己位相変調によって生じる光周波数変化を示す。図11(a)に示すような強度変調信号が光ファイバ伝送路を伝搬すると、光ファイバの非線形屈折率を介して自光信号に光強度に比例した光位相変化が生じる。この光位相変化を自己位相変調 (SPM) という。光位相変化の時間微分は光周波数変動に対応するため、図11(b)に示すように光強度変化に応じて位相が変化する際に光周波数変動が生じる。このように、NRZ符号を用いたIM-DD方式では、符号が変化するビットの境界でのみ光周波数変動が生じる。この光周波数変動が光伝送路中の群速度分散により、光強度変化に変換される効果をSPM+GVD効果という。

【0019】図12は、NRZ符号を用いたIM-DD方式の1波長伝送時の信号波形を示す。ここでは、波長分散値 2.5ps/nm/kmの光伝送路を 120kmごとに光増幅中継し、360km伝送した場合の波形変化を示す。(a)は伝送前、(b)は伝送後の波形を示す。なお、群速度分散のみの影響を除くため、伝送後に分散補償ファイバにより光伝送路の群速度分散を補償した。

【0020】図12(b)中の2つの矢印は、ともに送信信号の“1”を表しているが、前後のビットの符号に依存し、波形が大きく異なっていることがわかる。図11に示すように、自己位相変調の光周波数変動は、符号が変化するビットの境界のみで生じるが、この光周波数変動はその前後のビットに対して影響を与え、符号間干渉を生じさせる。この符号間干渉により、前後のビットの符号に依存した波形のばらつきが生じ、信号に誤りが生じることになる。

【0021】次に、DPSK+DD方式におけるSPM+GVD効果の影響について説明する。図13は、位相変調信号の光強度とその光周波数変化の関係を示す。

(a)は位相変調信号の波形、(b)は誘起される自己位相変調によって生じる光周波数変化を示す。図13(a)に示すように、位相変調信号は送信信号を光の相對位相に対応させるため、光強度を一定にできるが、光位相は変化する。特に、符号が変換し、光の相對位相が“0”から“ π ”、“ π ”から“0”に変化するビットの境界で位相変化が生じる。

【0022】上述したように、光位相変化の時間微分が光周波数変動になるので、光位相が変化するときのビッ

ト境界に図13(b)に示すような光周波数変動が生じる。光周波数変動は、群速度分散がある光ファイバを伝送すると光強度変化に変換されるため、位相変調信号においても強度変調信号と同様に送信信号に依存した強度変化を生じることになる。この送信信号に依存した強度変化により、上述のIM-DD方式と同様に、位相変調信号を用いた場合でもSPM+GVD効果による符号間干渉が生じ、波形劣化を招く。

【0023】図14は、DPSK-DD方式の1波長伝送時の信号波形を示す。ここでは、図12に示す信号波形と同一条件で位相変調信号を伝送させた場合の波形変化を示す。(a)は伝送前、(b)は伝送後の光復調器の出力波形を示す。IM-DD方式の場合と同様に、図14(b)中の2つの矢印は、ともに送信信号の“1”を表しているが、DPSK-DD方式においてもIM-DD方式と同様に前後ビットによって波形が大きく異なり、符号間干渉による波形のばらつきが生じている。

【0024】なお、SPM+GVD効果による符号間干渉を低減させるために、IM-DD方式においてRZ (Return to Zero) 符号を用いることが検討されている。この場合には、SPM+GVD効果による劣化は低減されるが、ASE光による信号劣化は改善できない。

【0025】(XPM+GVD効果) 次に、波長多重伝送で問題となるSPM+GVD効果およびXPM+GVD効果のうち、XPM+GVD効果について詳細に説明する。

【0026】光強度により送信信号を伝送するIM-DD方式では、送信信号に対応した光強度変化が光ファイバの非線形屈折率を介して隣接波長の位相を変化させる。この位相変化により生じる光周波数変化が、群速度分散により強度揺らぎとして現れる効果をXPM+GVD効果という。

【0027】図15は、NRZ符号を用いたIM-DD方式で波長多重伝送を行った場合の相互位相変調によって生じる光周波数変化を示す。図15(a)、(b)は、波長 λ_1 、 λ_2 の光強度変調信号の波形を示す。図15(a)、(b)間の矢印は、光強度の変化によって隣接波長間の相互位相変調が生じる点を示し、例えば下向きの矢印は波長 λ_1 の光信号が波長 λ_2 の光信号に光周波数変化を生じさせることを意味する。図15(c)は、波長 λ_1 の光信号の強度変化によって波長 λ_2 の光信号に生じる光周波数変化を示す。

【0028】図15(a)、(b)に示すように、隣接波長間には送信信号の相関はないので、隣接チャネル間の強度変化には相関はない。このため、図15(c)に示すように、隣接チャネルの影響により生じた光周波数変化は自光信号とは無関係なランダムな変化となる。このランダムな光周波数変化は、光ファイバ中の群速度分散によりランダムな強度変化に変換される。

【0029】次に、上述したXPM+GVD効果による

ランダムな波形劣化の受信後の周波数分布について説明する。図16は、NRZ符号を用いたIM-DD方式で生じるXPM+GVD効果の周波数分布を示す。ここでは、中心波長を連続光とし、他を10Gbit/sのビットレートでNRZ符号を用いて強度変調した3波長の波長多重光信号について、伝送時の中心波長の光信号を直接検波した場合の電気スペクトルを示す。

【0030】この電気スペクトルは連続光を受光した際のものであるので、本来は周波数0Hz成分のみ存在し、他の周波数成分は存在しない。しかし、図16に示すように、本来スペクトルが存在しない領域にブロードなスペクトルが生じている。このスペクトルは、隣接波長のXPM+GVD効果によるランダムな強度変化によって生じたものである。XPM+GVD効果により生じたスペクトルは、図に示すように信号周波数帯域と重なっており、取り除くことは不可能である。このため、受信部においてランダムな信号劣化が生じることになる。

【0031】以上、NRZ符号を用いたIM-DD方式におけるXPM+GVD効果の影響について説明したが、DPSK-DD方式についてもSPM+GVD効果と同様に信号劣化を生じる。また、RZ符号を用いたIM-DD方式についても、強度変化は送信信号に依存し、隣接波長にXPM+GVD効果によるランダムな信号劣化を与える。

【0032】図17は、100GHz間隔の3波長多重伝送実験により得られたアイパターンを示す。信号のビットレートは10Gbit/sとした。また、実験に用いた光伝送路は波長分散値2.5ps/nm/kmであり、120kmごとに光増幅中継し、360km伝送した。なお、群速度分散のみの影響を除くため、伝送後に分散補償ファイバにより光

伝送路の群速度分散を補償した。

【0033】図17(a), (b), (c)は、それぞれNRZ符号を用いたIM-DD方式、RZ符号を用いたIM-DD方式、DPSK-DD方式のアイパターンを示す。なお、比較のために、伝送前のアイパターンもそれぞれ同時に示す。図に示すように、3波長多重伝送後のアイパターンは、伝送前と比較して波形がランダムに劣化し、“0”と“1”のレベル差が小さくなって誤りが生じやすくなっていることがわかる。このように、波長多重伝送を行った場合は、SPM+GVD効果に加え、XPM+GVD効果によりランダムな波形劣化を受けて信号が劣化する。

【0034】なお、ここでは波長多重伝送を行った場合の非線形光学効果の例として、XPM+GVD効果による劣化について説明したが、光強度変化すなわち光パワーの変化が他の波長に影響を与える現象については、上記のXPM+GVD効果と同様の劣化を生じさせる。

【0035】このように、光伝送システムでは、非線形光学効果と光SNR劣化の影響により信号が劣化する。特に、SPM+GVD効果およびXPM+GVD効果に

よる影響は、従来技術を用いる光伝送システムにおいて光増幅中継数の大きな制限要因となっている。

【0036】本発明は、SPM+GVD効果やXPM+GVD効果等の非線形光学効果、および光SNR劣化による光増幅中継数の制限を緩和し、光伝送路における再生中継器を最小限に抑えて経済的なネットワークを構築することができる光伝送装置および光伝送システムを提供することを目的とする。

【0037】

【課題を解決するための手段】請求項1に記載の光伝送装置は、単一波長の光を発生する光源と、デジタル信号により単一波長の光を位相変調する位相変調手段と、位相変調された光信号の各ビットの境界で光強度が小さくなるように強度変調する強度変調手段とを備え、位相変調および強度変調された光信号を送信する。

【0038】請求項2に記載の光伝送装置は、異なる波長の光を発生する複数の光源と、複数のデジタル信号により各波長の光をそれぞれ位相変調する複数の位相変調手段と、位相変調された各波長の光信号の各ビットの境界で光強度が小さくなるようにそれぞれ強度変調する複数の強度変調手段と、位相変調および強度変調された各波長の光信号を合波する光合波器とを備え、光合波器から出力される波長多重光信号を送信する。

【0039】このように、デジタル送信信号により位相変調されたビットの境界で、光強度が小さくなるように信号のビットに同期したタイミングで強度変調を行うので、送信波形の強度変化はすべてのビットにおいて一様になり、ビットの境界で光強度が小さくなる。これにより、SPM+GVD効果により生じる符号間干渉を抑圧でき、信号劣化を低減することができる。

【0040】請求項3に記載の光伝送装置は、デジタル信号により位相変調された光信号を復調して電気信号に変換する光復調手段と、電気信号を識別再生してデジタル信号を出力する識別再生手段とを備え、請求項1に記載の光伝送装置から送信された光信号を光復調手段に受信する。

【0041】請求項4に記載の光伝送装置は、複数のデジタル信号により各波長の光信号がそれぞれ位相変調された波長多重光信号を各波長の光信号に分波する光分波器と、各波長の光信号を復調してそれぞれ電気信号に変換する複数の光復調手段と、各電気信号を識別再生してそれぞれ対応するデジタル信号を出力する複数の識別再生手段とを備え、請求項2に記載の光伝送装置から送信された波長多重光信号を光分波器に受信して分波する。

【0042】また、光復調手段で復調された電気信号のクロック周波数以上の周波数成分を減衰させる手段を備えてもよい（請求項5）。本発明の光伝送装置から送信された光信号は、送信信号のクロック周波数と一致した成分により強度変調された波形となる。したがって、X

PM+GVD効果による波形劣化は隣接チャネルの強度変化の周期であるクロック周波数およびその通倍の周波数に生じるので、復調信号からクロック周波数以上の成分を減衰させることにより、XPM+GVD効果による波形劣化を低減することができる。

【0043】また、光復調手段は、入力された光信号を前後のビット間で干渉させ、光信号の位相変調成分を強度変調成分に変換する光弁別器と、光弁別器の出力光信号を電気信号に変換する光電変換器とにより構成してもよい（請求項6）。

【0044】請求項7に記載の光伝送システムは、請求項1に記載の光伝送装置と、この光伝送装置から送信された光信号または波長多重光信号を送送する光ファイバ伝送路と、光ファイバ伝送路を送送された光信号を受信する請求項3に記載の光伝送装置とを備えた構成である。

【0045】請求項8に記載の光伝送システムは、請求項2に記載の光伝送装置と、この光伝送装置から送信された光信号または波長多重光信号を送送する光ファイバ伝送路と、光ファイバ伝送路を送送された波長多重光信号を受信する請求項4に記載の光伝送装置とを備えた構成である。

【0046】

【発明の実施の形態】（第1の実施形態）図1は、本発明の光伝送装置および光伝送システムの第1の実施形態を示す。DPSK-DD方式による変復調部の基本的な部分は、図10に示す従来の構成と同様である。ここでは、1波長の光信号を送送する構成を示す。

【0047】図において、送信部10では、デジタル送信信号を符号化器14に入力して符号化する。光源11から出力される波長 λ_1 の連続光は光位相変調器15に入力され、符号化器14の出力信号により位相変調される。この位相変調信号は、クロック信号で駆動される光強度変調器16に入力され、ビットの境界で光強度が小さくなるようにビットごとに強度変調される。この光信号は、光ファイバ伝送路30-1~30-mおよびその損失を補償する光増幅器31-1~31-mを介して受信部20まで伝送される。

【0048】受信部20では、受信した光信号が光復調器24に入力される。光復調器24は、光弁別器25とバランス型受光器26から構成される。光弁別器25は2入力2出力のマッハツェンダ干渉計により構成し、一方の入力ポートから入力した光信号を2分岐し、その一方に1ビット分時間遅延させた後に合波して2つの出力ポートに出力する。一方の出力ポートには、送信信号と等しい光強度信号が出力され、他方の出力ポートには論理反転した光強度信号が出力される。光弁別器25から出力される2つの光強度信号はバランス型受光器26に受光され、送信信号に応じた電気信号が復調される。電気信号は識別再生回路23により識別再生され、ディジ

タル受信信号として出力される。

【0049】このように本発明の特徴は、送信部10を構成する光伝送装置にあり、送信する位相変調信号に対して光強度変調器16を用いてビットの境界で光強度が小さくなるように強度変調するところにある。受信部20を構成する光伝送装置は従来のもので対応することができる。

【0050】本実施形態は、1波長の光信号を送送するものであるが、このときに影響を与える非線形光学効果はSPM+GVD効果である。上述したように、NRZ符号を用いるIM-DD方式、DPSK-DD方式では、SPM+GVD効果により生じる符号間干渉によって信号が劣化する。本実施形態では、デジタル送信信号により位相変調されたビットの境界で、光強度が小さくなるように信号のビットに同期したタイミングで強度変調を行う。このため、送信波形の強度変化はすべてのビットにおいて一様になり、ビットの境界で光強度が小さくなる。ビットの境界の光強度を小さくすれば、SPM+GVD効果により生じる符号間干渉を抑圧でき、信号劣化を低減することができる。

【0051】なお、本実施形態では、送信部10から位相変調信号を送信し、受信部20で光弁別器25およびバランス型受光器26を用いた復調処理を行う構成であるので、従来のDPSK-DD方式と同様に受信感度を高め、光増幅器31のASE光の影響を小さくすることができる。RZ符号を用いたIM-DD方式でも、SPM+GVD効果により生じる符号間干渉を抑圧できるが、本発明の構成ではASE光の影響も合わせて低減できるところに特徴がある。

【0052】図2は、第1の実施形態における1波長伝送時の信号波形を示す。ここでは、ビットレート10Gbit/sの信号を波長分散値2.5ps/nm/kmの光伝送路で120kmごとに光増幅中継し、360km伝送した場合の波形変化を示す。(a)は伝送前、(b)は伝送後の光復調器の出力波形を示す。なお、群速度分散のみの影響を除くため、伝送後に分散補償ファイバにより光伝送路の群速度分散を補償した。

【0053】従来のIM-DD方式やDPSK-DD方式では、図17に示すように、SPM+GVD効果による符号間干渉により、前後のビットの依存して波形が変化し劣化が生じているのに対して、本実施形態では符号間干渉を抑圧できるので波形劣化が小さいことが分かる。

【0054】図3は、第1の実施形態における伝送後の符号誤り率特性を示す。なお、実験条件は図2の実験と同様である。本実験では、光伝送路の損失を30dBに固定し、光伝送路への光入力パワーを変化させた場合の符号誤り率を示す。図中の●印は、光入力パワーが小さい場合の符号誤り率であるが、後述する3波長伝送時の符号誤り率を転用した。これは、光入力パワーが小さい場

合には、非線形光学効果の影響はなく、1波長伝送時の符号誤り率とほぼ一致するからである。図3(a)はNRZ符号を用いたIM-DD方式、図3(b)はRZ符号を用いたIM-DD方式、図3(c)はDPSK-DD方式であり、図3(d)が本実施形態の符号誤り率である。

【0055】光伝送路への光入力パワーを減少させると、符号誤り率が悪化する。これは、上述したASE光による光SNR劣化の影響により、光入力パワーに下限が存在することを示す。一方、光伝送路への光入力パワーを上昇させると、符号誤り率がやはり悪化する。これは、非線形光学効果による影響で波形が劣化したことによる制限である。この上限、下限間の光入力パワーの範囲が広いほど、ASE光および非線形光学効果の影響が小さく、光増幅中継数を大きくすることができる。基準となる符号誤り率を 10^{-9} 以下とすると、これを満たす光入力パワーの範囲は、図3(d)に示す本実施形態のものが最大であり、ASE光および非線形光学効果の影響を低減できることがわかる。

【0056】なお、本実施形態では、光復調器24の光弁別器25としてマッハツェンダ干渉計を用いた構成を示したが、SPM+GVD効果による符号間干渉の低減効果は光復調器の構成によらないので、他の復調方式を用いた場合でも同様に光伝送路中で生じる符号間干渉を低減することができる。

【0057】また、光復調器24の復調信号からクロック周波数以上の成分を減衰させる手段として、例えば図1に示すように、受信部20の光復調器24と識別再生器23との間にフィルタを配置してもよい。本実施形態の送信部10では、光送信波形のすべてのビットが一樣な強度変化となるので、SPM+GVD効果による波形劣化もすべてのビットに同様に生じる。その結果、復調後の波形劣化は、クロック周波数と一致またはその通倍の周波数成分に生じる。したがって、光復調器24の出力に対してクロック周波数以上の成分を減衰させるフィルタを用いることにより、復調後の波形劣化を改善することができる。

【0058】(第2の実施形態) 図4は、本発明の光伝送装置および光伝送システムの第2の実施形態を示す。DPSK-DD方式による変復調部の基本的な部分は、図10に示す従来の構成と同様である。ここでは、 n 波長多重伝送する構成を示す。

【0059】図において、送信部10では、複数のデジタル送信信号をそれぞれ符号化器14-1~14- n に入力して符号化する。複数の光源11-1~11- n で発生させた波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の連続光を光位相変調器15-1~15- n に入力し、符号化器14-1~14- n の出力信号によりそれぞれ位相変調した光信号を生成する。各波長の位相変調信号は、それぞれクロック信号で駆動される光強度変調器16-1~16- n に入力され、ビットの境界で光強度が小さくなるようにビットご

とに強度変調される。各波長の光信号は、光合波器13で波長多重され、光ファイバ伝送路30-1~30- m およびその損失を補償する光増幅器31-1~31- m を介して受信部20まで伝送される。

【0060】受信部20では、光分波器21で各波長の光信号に分波し、それぞれ対応する光復調器24-1~24- n に入力される。光復調器24は、光弁別器25とバランス型受光器26から構成される。光弁別器25は2入力2出力のマッハツェンダ干渉計により構成し、一方の入力ポートから入力した光信号を2分岐し、その一方に1ビット分時間遅延させた後に合波して2つの出力ポートに出力する。一方の出力ポートには、送信信号と等しい光強度信号が出力され、他方の出力ポートには論理反転した光強度信号が出力される。光弁別器25から出力される2つの光強度信号はバランス型受光器26に受光され、送信信号に応じた電気信号が復調される。各光復調器24-1~24- n から出力される電気信号は、それぞれ識別再生回路23-1~23- n により識別再生され、デジタル受信信号として出力される。

【0061】本実施形態では、第1の実施形態と同様に、デジタル送信信号により位相変調されたビットの境界で、光強度が小さくなるように信号のビットに同期したタイミングで強度変調を行うので、送信波形の強度変化はすべてのビットにおいて一樣になり、ビットの境界で光強度が小さくなる。これにより、SPM+GVD効果により生じる符号間干渉を抑圧でき、信号劣化を低減することができる。

【0062】次に、本実施形態において、XPM+GVD効果によって生じる信号劣化を低減する原理について説明する。図5は、第2の実施形態で相互位相変調によって生じる光周波数変化を示す。図5(a)、(b)は、波長 λ_1 、 λ_2 の位相変調・強度変調信号の波形を示す。図5(a)、(b)間の矢印は、相互位相変調により隣接波長間の光強度変化による光周波数変動が生じる点を示す。例えば下向きの矢印は、波長 λ_1 の光信号が波長 λ_2 の光信号に光周波数変化を生じさせることを意味する。図5(c)は、波長 λ_1 の光信号の強度変化によって波長 λ_2 の光信号に生じる光周波数変化を示す。

【0063】本実施形態では、図5(a)、(b)に示すように、デジタル送信信号は光の位相により伝達されるので、光強度は送信信号によらず、ビットの境界で常に光強度が小さくなる。このため、送信信号のクロック周波数と一致した成分により強度変調された波形となる。また、全てのビットが同一の強度変調を受けるため、図中の矢印のように、XPM+GVD効果も全てのビットで一樣に影響を与える。この結果、図5(c)に示すように、隣接チャネルからの相互位相変調により生じる光周波数変化の周期はビットレートと一致することになる。

【0064】このように、本実施形態におけるXPM+GVD効果による波形劣化は、隣接チャネルの強度変化

の周期であるクロック周波数およびその通倍の周波数に生じる。したがって、光復調器 24 の復調信号からクロック周波数以上の成分を減衰させる手段として、例えば図 4 に示すように、受信部 20 の光復調器 24 と識別再生器 23 との間にフィルタを配置することにより、XPM+GVD 効果による波形劣化を低減することが可能となる。

【0065】ここで、第 2 の実施形態における XPM+GVD 効果による波形劣化の受信後の周波数分布について説明する。図 6 は、第 2 の実施形態における XPM+GVD 効果の周波数分布を示す。ここでは、中心波長を連続光とし、他を本発明により位相変調・強度変調したビットレート 10 Gbit/s の 3 波長の波長多重光信号について、伝送時の中心波長の光信号を直接検波した場合の電気スペクトルを示す。

【0066】この電気スペクトルは連続光を受光した際のものであるので、本来は周波数 0 Hz 成分のみ存在する。他の周波数成分は、隣接波長の XPM+GVD 効果による影響を示している。IM-DD 方式では、図 16 に示すように信号帯域全域にわたりブロードなスペクトルが生じていたが、本実施形態の XPM+GVD 効果による波形劣化は、隣接チャネルの強度変化の周期であるクロック周波数およびその通倍の周波数に生じている。したがって、その波形劣化成分は、クロック周波数以上の成分を減衰させるフィルタにより容易に取り除くことができる。

【0067】図 7 は、第 2 の実施形態の構成による 3 波長多重伝送実験により得られたアイパターンを示す。信号のビットレートは 10 Gbit/s とした。また、実験に用いた光伝送路は波長分散値 2.5 ps/nm/km であり、120 km ごとに光増幅中継し、360 km 伝送した。なお、群速度分散のみの影響を除くため、伝送後に分散補償ファイバにより光伝送路の群速度分散を補償した。図 17 に示す従来構成では、3 波長多重伝送後のアイパターンが大きく波形劣化していたが、本実施形態の構成では 3 波長多重伝送後のアイパターンに顕著な劣化が見られず、SPM+GVD 効果および XPM+GVD 効果による波形劣化が抑圧できていることがわかる。

【0068】図 8 は、第 2 の実施形態における伝送後の符号誤り率特性を示す。なお、実験条件は図 2 の実験と同様である。本実験では、光伝送路の損失を 30 dB に固定し、光伝送路への光入力パワーを変化させた場合の符号誤り率を示す。図 8 (a) は NRZ 符号を用いた IM-DD 方式、図 8 (b) は RZ 符号を用いた IM-DD 方式、図 8 (c) は DPSK-DD 方式であり、図 8 (d) が本実施形態の符号誤り率である。なお、参考のために、1 波長伝送時の符号誤り率についても表示している (▲印)。

【0069】1 波長伝送時と 3 波長伝送時の符号誤り率を比較すると、光伝送路への光入力パワーが大きい場合

に、3 波長伝送時の符号誤り率が高くなることがわかる。これは、波長間の相互作用による XPM+GVD 効果により生じる波形劣化が原因であるが、その中では図 8 (d) に示す本実施形態のものが符号誤り率の劣化が最小限に抑えられていることが分かる。

【0070】この XPM+GVD 効果による波形劣化は、上述したように復調出力に対してクロック周波数以上の成分を減衰させる手段を用いることにより低減することができる。実験では、光復調器の帯域がビットレートである 10 GHz 程度のもを用いることにより、XPM+GVD 効果による波形劣化を低減でき、符号誤り率の劣化を抑圧できた。ここで、基準となる符号誤り率を 10^{-9} 以下とすると、これを満たす光入力パワーの範囲は、図 8 (d) に示す本実施形態のものが最大であり、ASE 光および非線形光学効果の影響を低減できることがわかる。これにより、光増幅中継数を増やすことができ、経済的な光伝送システムを構築することができる。

【0071】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の光伝送装置および光伝送システムは、デジタル送信信号により位相変調されたビットの境界で、光強度が小さくなるように信号のビットに同期したタイミングで強度変調を行うので、送信波形の強度変化はすべてのビットにおいて一様になり、ビットの境界で光強度が小さくなる。これにより、SPM+GVD 効果により生じる符号間干渉を抑圧でき、信号劣化を低減することができる。

【0072】また、本発明の光伝送装置から送信された光信号は、送信信号のクロック周波数と一致した成分により強度変調された波形となる。したがって、XPM+GVD 効果による波形劣化は隣接チャネルの強度変化の周期であるクロック周波数およびその通倍の周波数に生じるので、復調信号からクロック周波数以上の成分を減衰させることにより、XPM+GVD 効果による波形劣化を低減することができる。

【0073】なお、復調信号からクロック周波数以上の成分を減衰させる構成は、1 波長伝送時にも効果がある。すなわち、光送信波形のすべてのビットが一様な強度変化となるので、SPM+GVD 効果による波形劣化もすべてのビットに同様に生じる。その結果、復調後の波形劣化は、クロック周波数と一致またはその通倍の周波数成分に生じる。したがって、復調信号からクロック周波数以上の成分を減衰させることにより、復調後の波形劣化を改善することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の光伝送装置および光伝送システムの第 1 の実施形態を示すブロック図。

【図 2】第 1 の実施形態における 1 波長伝送時の信号波形を示す図。

【図 3】第 1 の実施形態における伝送後の符号誤り率特性を示す図。

【図 4】本発明の光伝送装置および光伝送システムの第 2 の実施形態を示すブロック図。

【図 5】第 2 の実施形態で波長多重伝送を行った場合の相互位相変調によって生じる光周波数変化を示す図。

【図 6】第 2 の実施形態における XPM+GVD 効果の周波数分布を示す図。

【図 7】第 2 の実施形態の構成による 3 波長多重伝送実験により得られたアイパターンを示す図。

【図 8】第 2 の実施形態における伝送後の符号誤り率特性を示す図。

【図 9】IM-DD方式を用いた従来の波長多重光伝送システムの構成例を示すブロック図。

【図 10】DPSK-DD方式を用いた従来の波長多重光伝送システムの構成例を示すブロック図。

【図 11】IM-DD方式で生じる自己位相変調による光周波数変化を示す図。

【図 12】NRZ符号を用いたIM-DD方式の 1 波長伝送時の信号波形を示す図。

【図 13】位相変調信号の光強度とその光周波数変化の関係を示す図。

【図 14】DPSK-DD方式の 1 波長伝送時の信号波形を示す図。

【図 15】NRZ符号を用いたIM-DD方式で波長多

重伝送を行った場合の相互位相変調によって生じる光周波数変化を示す図。

【図 16】NRZ符号を用いたIM-DD方式で生じるXPM+GVD効果の周波数分布を示す図。

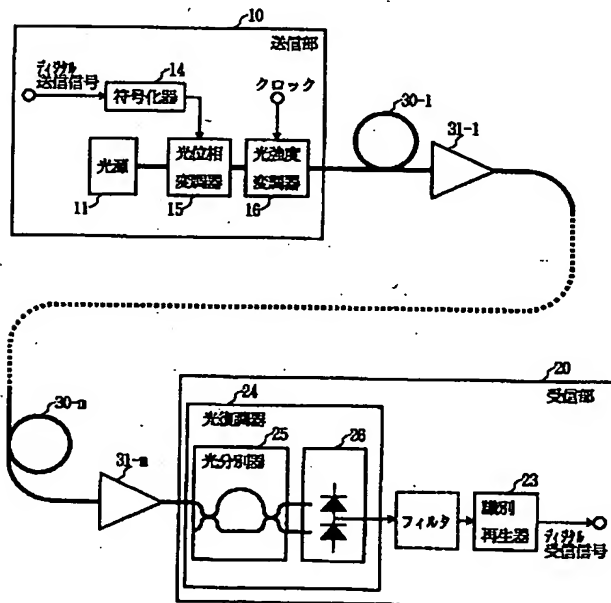
【図 17】100 GHz 間隔の 3 波長多重伝送実験により得られたアイパターンを示す図。

【符号の説明】

- 10 送信部
- 11 光源
- 12 光強度変調器
- 13 光合波器
- 14 符号化器
- 15 光位相変調器
- 16 光強度変調器
- 20 受信部
- 21 光分波器
- 22 受光素子
- 23 識別再生器
- 24 光復調器
- 25 光弁別器
- 26 バランス型受光器
- 30 光ファイバ伝送路
- 31 光増幅器

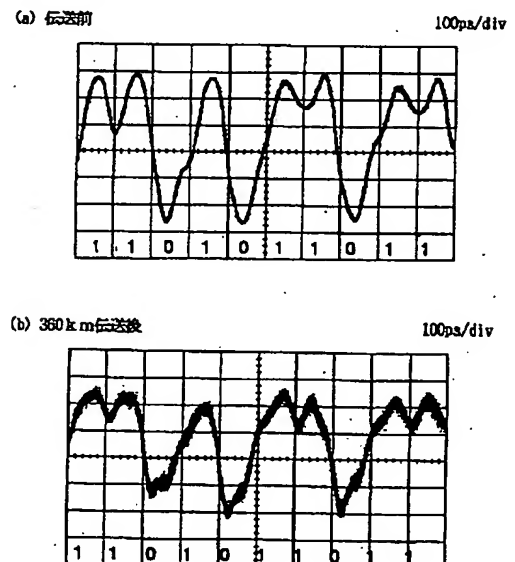
【図 1】

本発明の光伝送装置および光伝送システムの第 1 の実施形態



【図 2】

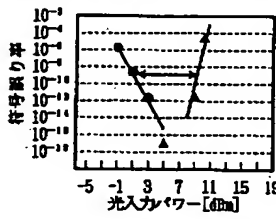
第 1 の実施形態における 1 波長伝送時の信号波形



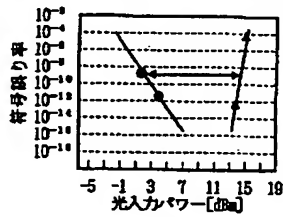
【図 3】

第1の実施形態における伝送後の符号誤り率特性

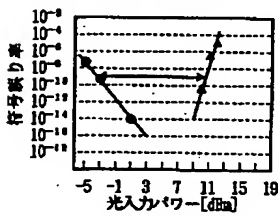
(a) NRZ符号を用いたIM-DD方式



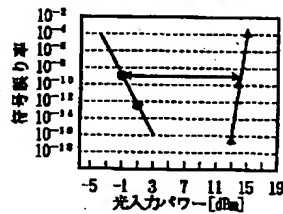
(b) RZ符号を用いたIM-DD方式



(c) DPSK-DD方式

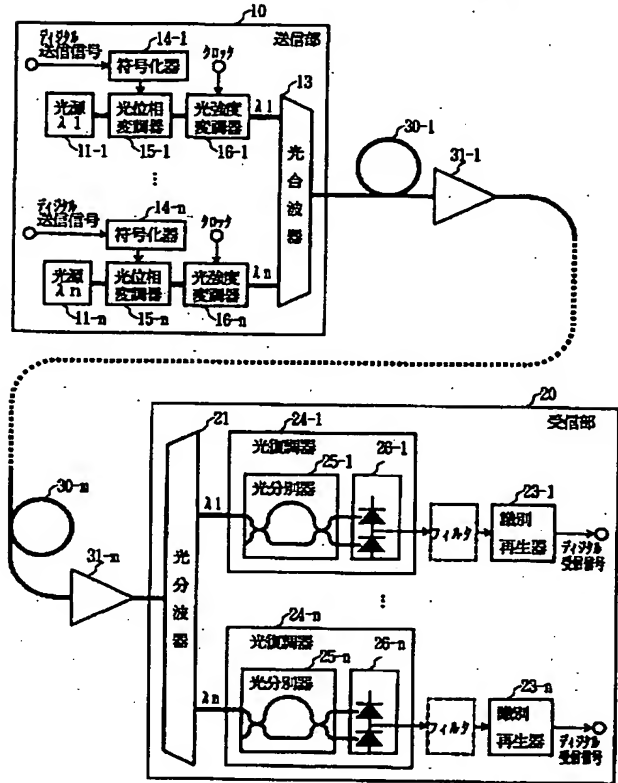


(d) 第1の実施形態



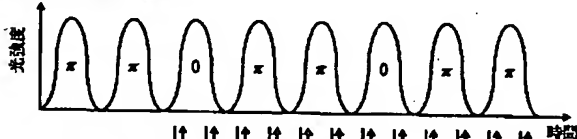
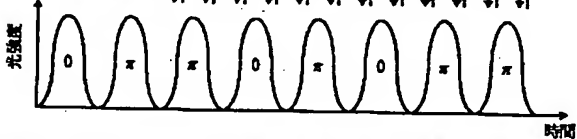
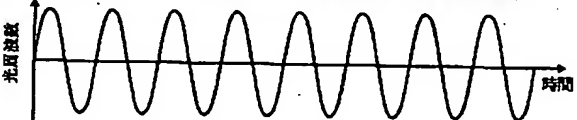
【図 4】

本発明の光伝送装置および光伝送システムの第2の実施形態



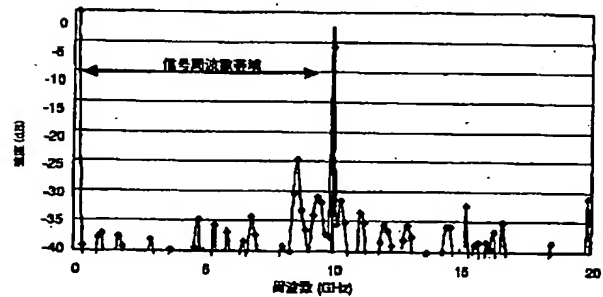
【図 5】

第2の実施形態で相互位相変調によって生じる光周波数変化

(a) 波長 λ_1 の光信号の波形(b) 波長 λ_2 の光信号の波形(c) 波長 λ_1 の光信号の強度変化により波長 λ_2 の光信号に生じる光周波数変化

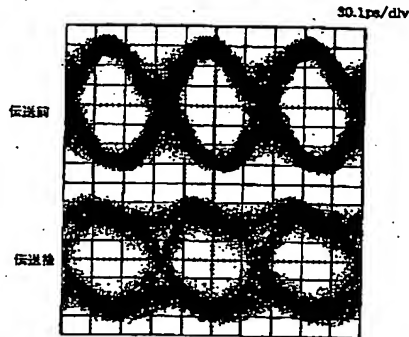
【図 6】

第2の実施形態におけるXPM+GVD効果の周波数分布



【図 7】

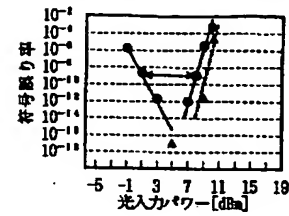
第2の実施形態の構成による3波長多重伝送実験により得られたアイパターン



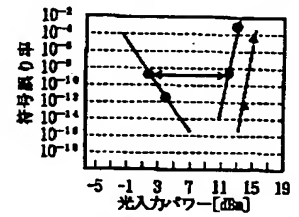
【図 8】

第2の実施形態における伝送後の符号誤り率特性

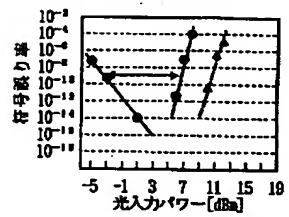
(a) NRZ符号を用いたIM-DD方式



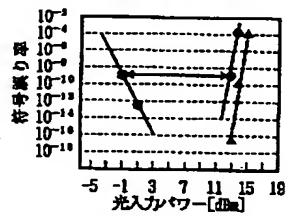
(b) RZ符号を用いたIM-DD方式



(c) DPSK-DD方式

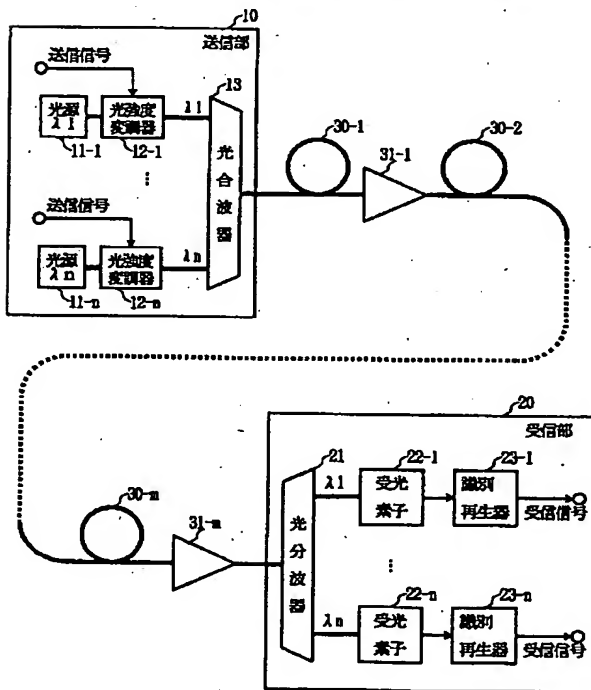


(d) 第2の実施形態



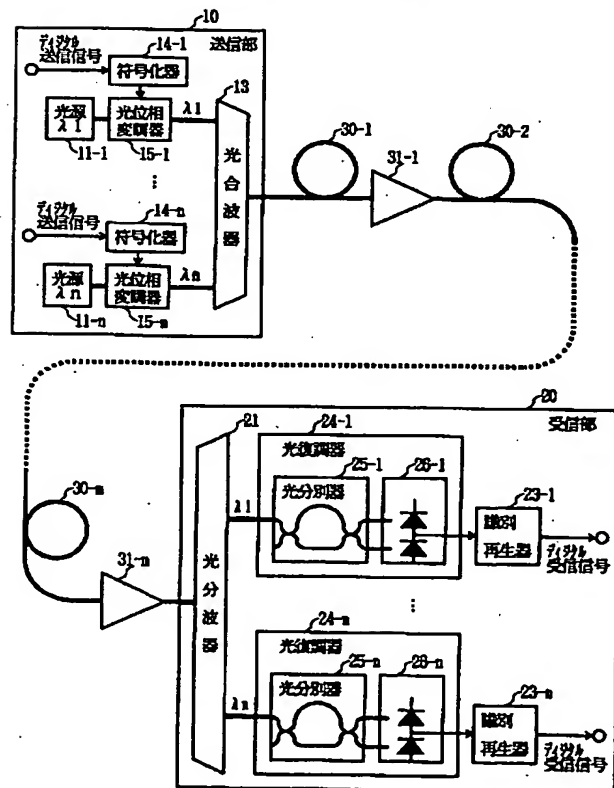
【図 9】

IM-DD方式を用いた従来の波長多重伝送システムの構成例



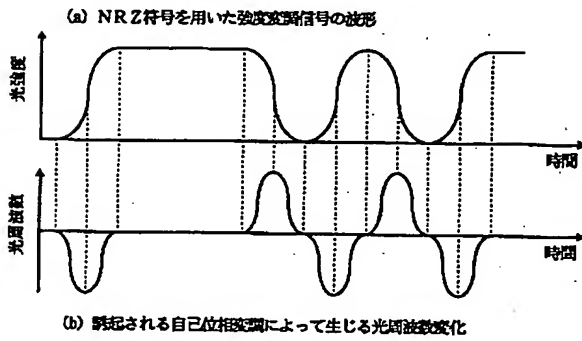
【図 10】

DPSK-DD方式を用いた従来の波長多重伝送システムの構成例



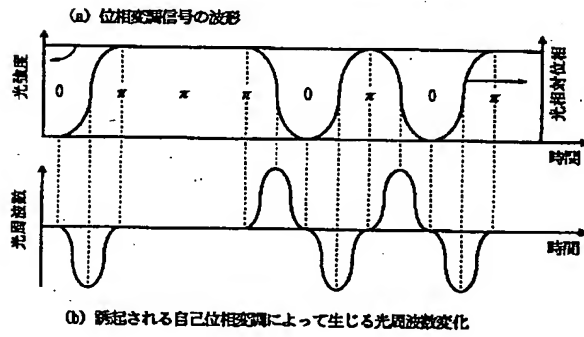
【図 1 1】

IM-DD方式で生じる自己位相変調による光周波数変化



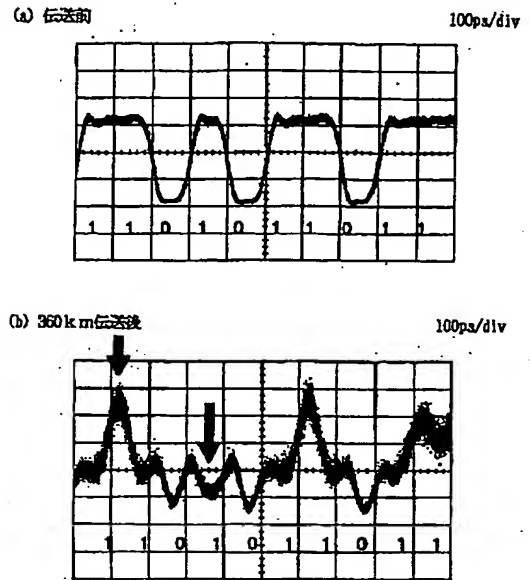
【図 1 3】

位相変調信号の光強度とその光周波数変化の關係



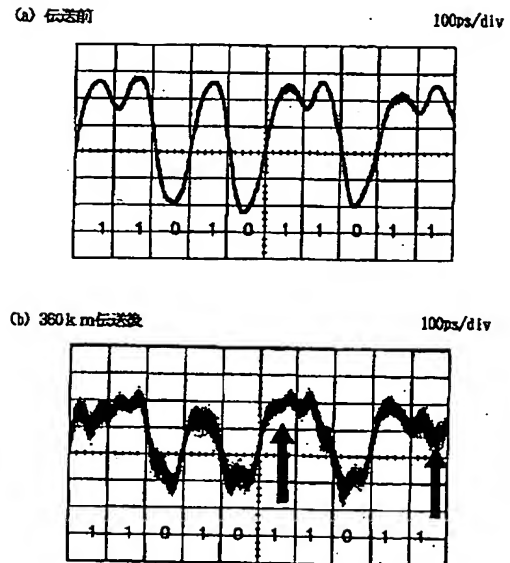
【図 1 2】

NRZ符号を用いたIM-DD方式の1波長伝送時の信号波形



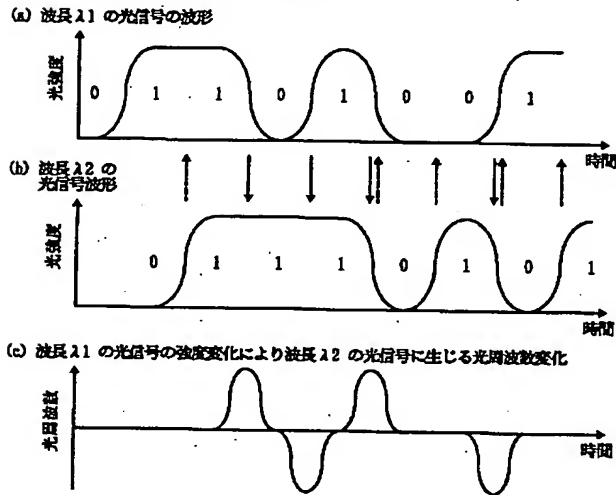
【図 1 4】

DPSK-DD方式の1波長伝送時の信号波形



【図15】

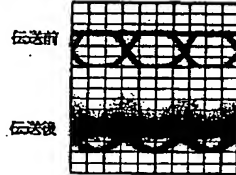
NRZ符号を用いたIM-DD方式で波長多重伝送を行った場合の相互位相変動によって生じる光周波数変化



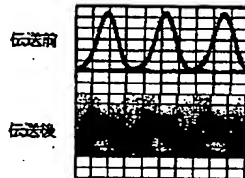
【図17】

100GHz間隔の3波長多重伝送実験により得られたアイパターン

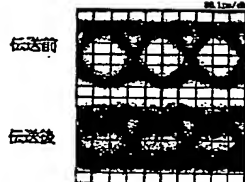
(a) NRZ符号を用いたIM-DD方式



(b) RZ符号を用いたIM-DD方式

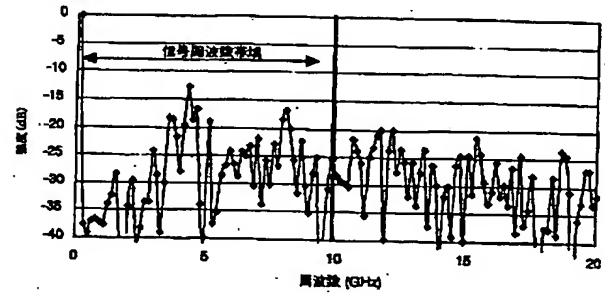


(c) DPSK-DD方式



【図16】

NRZ符号を用いたIM-DD方式で生じるXPM-GVD効果の周波数分布



フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁷

識別記号

F I

ターマコード (参考)

H 0 4 J 14/02

H 0 4 B 10/02

10/18